Antiferromanyetik Van der Waals Heteroyapılarında Spin-Yörünge Torku Aracılığıyla Nöromorfik Matris-Vektör Hesaplama: Rezervuar Hesaplama Çerçevesinde Teorik Bir Öneri

Yazar: Muzaffer Enes Yünlü
Bağlı Kurum: Bağımsız Araştırmacı
Tarih: Haziran 2026
arXiv Kategorisi: cond-mat.mes-hall, cond-mat.str-el
Lisans: CC0 1.0 Evrensel — Kamu Yararına Adanmıştır (Prior Art tescili amacıyla)

Özet

İki boyutlu (2B) bir antiferromanyetik (AFM) van der Waals heteroyapısı içinde spin-yörünge torku (SYT) dinamiklerini kullanan teorik bir nöromorfik hesaplama

çerçevesi sunuyoruz. $MnBi_2Te_4$/Pt gibi ağır-metal/AFM-yalıtkan çift katmanlarında, mevcut Landau-Lifshitz-Gilbert-Slonczewski (LLGS) denkleminin doğal olarak doğrusal-olmayan dinamikler ürettiğini ve bu dinamiklerin *Rezervuar Hesaplama* (Reservoir Computing, RC) mimarisine uygun bir hesaplama substratı oluşturduğunu gösteriyoruz. Sinaptik ağırlıklar, sıfır net mıknatıslanmaya sahip AFM alt-örgüsünün Néel vektörü **L** yöneliminde kodlanır; girdiler ise Spin Hall etkisiyle üretilen spin-polarize akım darbeleri olarak enjekte edilir. Ağırlık güncelleme mekanizması, magnon sönümlemesinden kaynaklanan gerçek enerji maliyetlerini (Joule ısınması sıfır değil, ancak klasik CMOS'a kıyasla birkaç mertebelik derecede daha düşük) açıkça ele alır. Doğrusal-olmamayı bir kusur olarak değil, doğal bir ReLU benzeri eşik aktivasyon işlevi olarak kurguladık. Bu çalışma patent-karşıtı *Prior Art* amaçlı kamu malına adanmıştır; içerdiği tüm mimari iddiaların gelecekteki geniş patent başvurularını geçersiz kılması hedeflenmekte ve CERN Açık Donanım Lisansı (OHL) kapsamında açık kaynak olarak önerilmektedir.

---

1. Giriş

Derin sinir ağlarının (DNN) hesaplama yoğunluğu, büyük ölçüde matris-vektör çarpımı (MVM) operasyonu üzerine kuruludur. Mevcut CMOS tabanlı

hızlandırıcılar, von Neumann darboğazından muzdariptir: bellek ve işlem birimleri arasındaki veri hareketi, toplam enerji tüketiminin büyük bölümünü oluşturur [LeCun et al., 2022]. Bu darboğazı aşmak için *bellek içi hesaplama* (compute-in-memory, CiM) paradigması önerilmekte; dirençli bellekler (RRAM), faz-değişim bellekleri (PCM) ve manyetik tünel eklemi (MTJ) tabanlı cihazlar öne çıkmaktadır [Dieny et al., 2020].

Öte yandan antiferromanyetik (AFM) spintronik, son yıllarda ferromanyetik alternatiflere göre önemli avantajlar sergilemiştir: (i) net mıknatıslanmanın yokluğu, harici manyetik alanlara ve komşu hücrelerden kaynaklanan çapraz konuşmaya karşı doğal bir bağışıklık sağlar; (ii) AFM rezonans frekansları (~0,1–10 THz), ferromanyetik rezonansların (~GHz) çok üzerinde yer alarak daha hızlı anahtarlama imkânı sunar [Jungwirth et al., 2016; Baltz et al., 2018]. $MnBi_2Te_4$ gibi 2B van der Waals AFM malzemeleri, kristal anizotropisi ve Néel sıcaklığı bakımından topolojik özelliklerle zenginleşmiş bir parametre uzayı sunmaktadır [Otrokov et al., 2019].

Bu çalışmada üç özgün katkı sunuyoruz:

1. Bir AFM/ağır-metal heteroyapısında Néel vektörü yönelimine dayalı sinaptik ağırlık kodlamasının matematiksel çerçevesini kuruyoruz.

2. LLGS dinamiklerinin doğrusal-olmayan yapısının, sistemi bir *Rezervuar Hesaplama* substratı olarak nasıl nitelendirdiğini gösteriyoruz ve bu nitelendirmeyi RC teorisinin standart kriterleriyle doğruluyoruz.
3. Gerçek enerji maliyetlerini (magnon sönümlemesi, Ohm kaybı) dahil eden bir enerji bütçesi sunuyoruz.

---

2. Malzeme Sistemi ve Fiziksel Mimari

2.1 Heteroyapı Tasarımı

Önerilen nöromorfik hücre iki fonksiyonel katmandan oluşur:

- **Katman A (Spin-Kaynak Katmanı):** Güçlü içkin spin-yörünge kuplajına sahip bir ağır metal; Pt (spin Hall açısı θ_SH ≈ 0,08–0,12) veya β-W (θ_SH ≈ 0,30–0,40) tercih edilir [Liu et al., 2012].
- **Katman B (AFM Ağırlık Katmanı):** $MnBi_2Te_4$ çift-katmanı (7 nm kalınlık); Néel sıcaklığı T_N ≈ 25 K (yalıtım limitinde) olup kapı voltajı veya basınçla 50 K üzerine taşınabileceği öngörülmektedir [Otrokov et al., 2019]. Oda sıcaklığı operasyonu için alternatif olarak MnF_2 (T_N = 67 K) veya α-Fe_2O_3

(T_N = 948 K) düşünülebilir; bu seçim açık bir araştırma sorusudur ve aşağıda §6'da tartışılmıştır.

Not: $MnBi_2Te_4$'ün düşük Néel sıcaklığı, oda sıcaklığı uygulamalarında ciddi bir pratik sınır oluşturmaktadır. Bu çalışmanın amacı oda sıcaklığı işletimini garanti etmek değil; hesaplama paradigmasının fiziksel temelini tesis etmektir. Oda sıcaklığı operasyonu, ileriki deneysel çalışmaların öncelikli hedefi olmalıdır.

2.2 Ağırlık Kodlaması: Néel Vektörü Yönelimi

AFM düzende iki alt-örgü mıknatıslanması $\mathbf{M}_1$ ve $\mathbf{M}_2$ tanımlanır. Bunların farkı Néel vektörünü verir:

$$\mathbf{L} = \mathbf{M}_1 - \mathbf{M}_2, \quad |\mathbf{M}_1| = |\mathbf{M}_2| = M_s$$

L birim vektörünün kristal kolay-eksenine göre polar açısı $\theta \in [0, \pi)$, sinaptik ağırlığı kodlar:

$$W_{ij} = W_{\max} \cos(\theta_{ij})$$

Bu kodlama [-W_max, +W_max] aralığında sürekli değerler alır; dolayısıyla hem uyarıcı hem de baskılayıcı sinaptik bağlantılar temsil edilebilir. Net makroskopik mıknatıslanmanın yokluğu ($\mathbf{M}_1 + \mathbf{M}_2 \approx 0$), komşu hücreler arasında dipol etkileşimini büyük ölçüde bastırır ve bu, ferromanyetik alternatifler üzerindeki temel paketle yoğunluğu avantajını açıklar [Baltz et al., 2018, §IV.A].

---

3. Teorik Çerçeve

3.1 LLGS Dinamikleri ve Gerçek Enerji Maliyeti

Bir spin-polarize akım **J**_s, Spin Hall etkisi (SHE) aracılığıyla B Katmanı üzerine bir SYT uygular. Néel vektörünün zamansal evrimi, iki alt-örgünün birleşik Landau-Lifshitz-Gilbert-Slonczewski (LLGS) denklemi ile yönetilir [Slonczewski, 1996; Gomonay & Loktev, 2010]:

$$\frac{d\mathbf{L}}{dt} = -\gamma , \mathbf{L} \times \mathbf{H}*{\text{eff}} ;+; \alpha , \mathbf{L} \times \frac{d\mathbf{L}}{dt} ;+; \boldsymbol{\tau}*{\text{SOT}}$$

Burada:

- **γ**: Jiromanyetik oran (γ = 1,76 × 10¹¹ rad·s⁻¹·T⁻¹)
- **H**_eff = **H**_ex + **H**_aniso: Değişim alanı ve kristal anizotropi alanının toplamı; AFM'de değişim alanı tipik olarak **H**_ex ~ 10–100 T mertebesindedir ve bu, spin dalga frekansını THz bandına taşır
- **α**: Gilbert sönüm parametresi ($MnBi_2Te_4$ için α ≈ 0,01–0,05; kesin değer deneysel belirsizlik taşır)
- **τ**_SOT = (ħ/2e) · θ_SH · (J_s / M_s d) · (**L** × (**m̂**_s × **L**)): SYT büyüklüğü; burada **m̂**_s enjekte edilen akımın spin polarizasyon yönü, d manyetik katman kalınlığı

Enerji Maliyeti Tartışması: α > 0 olduğu için, her anahtarlama olayında kaçınılmaz bir Gilbert sönüm kayıpları mevcuttur. Bir anahtarlama başına harcanan enerji:

$$E_{\text{switch}} \approx \alpha , \mu_0 M_s^2 V_{\text{cell}} \cdot \Delta\theta$$

burada V_cell hücre hacmi ve Δθ Néel vektörünün döndüğü açıdır. $MnBi_2Te_4$ parametreleri için kaba bir tahmin E_switch ~ 10–100 aJ/hücre/adım mertebesini verir; bu, CMOS SRAM yazma enerjisi (~fJ–pJ) ile karşılaştırıldığında birkaç mertebelik potansiyel avantaj sunar, ancak kesin rakamlar deneysel doğrulama gerektirmektedir.

Ayrıca, Katman A'daki Ohm ısısı ($P = \rho \cdot J^2 \cdot V$) da ihmal edilemez. Gerçekçi bir enerji bütçesi için her iki katkı birlikte değerlendirilmelidir.

3.2 Doğrusal-Olmayan Dinamikler ve Rezervuar Hesaplama

LLGS denkleminin en kritik özelliği doğrusal-olmamasıdır. **L**(**t**) evriminin tam analitik çözümü kapalı form almaz; yalnızca küçük-açı ($\theta \ll 1$) limitinde lineerleştirilmiş bir yaklaşım elde edilir. Bu durum, standart bir matris-vektör çarpım hızlandırıcısı tasarlamayı zorlaştırırken, *aynı zamanda* sistemi güçlü bir hesaplama substratı olarak nitelendirir.

Rezervuar Hesaplama (RC) çerçevesinde [Maass et al., 2002; Jaeger, 2001], yüksek boyutlu, doğrusal-olmayan bir dinamik sistem (*rezervuar*) sabit tutulur; yalnızca çıkış katmanı eğitilir. RC'nin üç temel kriteri şunlardır:

1. **Ayrışma özelliği (Separation property):** Farklı girdiler, rezervuarda ayırt edilebilir durum yörüngelerine yol açmalıdır.
2. **Yaklaşım özelliği (Approximation property):** Rezervuar durumları, hedef fonksiyonu yeterli doğrulukta yaklaşık temsil edebilmelidir.
3. **Yansıma özelliği (Echo state property):** Sistemin başlangıç koşuluna olan bağımlılığı zamanla sönümlenmeli; uzun-menzilli bellek baskılanmalıdır.

AFM/SYT sistemimizin bu kriterleri nasıl karşıladığı:

RC Kriteri	AFM/SYT Mekanizması
Ayrışma özelliği	Farklı **J**_s giriş profilleri, **L**(**t**) yörüngelerinde ölçülebilir faz-uzayı ayrışması üretir (LLGS doğrusal-olmamayı garanti eder)
Yaklaşım özelliği	**L**(**t**) durumlarının doğrusal kombinasyonu, polinom-benzeri evrensel yaklaşım sağlar (Stone-Weierstrass teoremi)

RC Kriteri	AFM/SYT Mekanizması
Yansıma özelliği	Gilbert sönümü (α > 0), başlangıç koşulunu ε ~ e^{-αγH_{ex}t} oranında sönümler; böylece sistem "unutur"

Bu çerçevede, AFM nöromorfik hücremiz bir *fiziksel rezervuar* olarak çalışır. Ağırlık eğitimi yalnızca çıkış okuma katmanında (örneğin anormal Hall voltajı ölçümü) gerçekleştirilir; rezervuar kendisi değişmez. Bu, yüksek paralel okuma senaryolarında son derece verimli bir eğitim paradigmasıdır.

3.3 SYT Tabanlı Eşik Aktivasyon Fonksiyonu

Giriş akımı **J**_s, belirli bir kritik değer J_c'nin altında kaldığında Néel vektörü stabil konfigürasyonunda kalmaktadır (anizotropi bariyeri aşılamaz). J_s > J_c olduğunda Néel vektörü döner ve çıkış sinyali V_out üretilir. Dolayısıyla sistem doğal bir eşik davranışı gösterir:

$$V_{\text{out}} = \begin{cases} 0 & J_s \leq J_c \ \eta \cdot f(\mathbf{L}, \mathbf{J}_s) & J_s > J_c \end{cases}$$

burada f doğrusal-olmayan bir fonksiyondur ve η malzeme dönüşüm verimliliğidir. Bu davranış, birleştirici-altı (sub-threshold) bölgede tam bir kes-0 eşiği olan ReLU aktivasyon fonksiyonuyla yapısal

benzerlik gösterir. Bununla birlikte f'nin ReLU ile tam olarak çakışıp çakışmadığı nicel olarak gösterilmesi gereken açık bir araştırma sorusudur.

3.4 Çıkış Okuma: Anormal Hall Voltajı

Sistem çıkışı, B Katmanı üzerinden ölçülen anormal Hall voltajı V_H aracılığıyla okunur:

$$V_H = R_H \cdot J \cdot \cos(\theta_L)$$

burada R_H anomali Hall direnci ve θ_L Néel vektörünün okuma akımı yönüne göre açısıdır. Bu okuma mekanizması yıkıcı değildir; **L**'nin anlık yönelimini bozmadan anlık ağırlık değerini elde etmeyi sağlar. Oda sıcaklığında R_H'ın yeterince büyük olup olmayacağı deneysel doğrulama gerektiren kritik bir parametredir.

---

4. Yanlışlanabilir Deneysel İmzalar

Bu çerçevenin bilimsel geçerliliği, aşağıdaki üç ölçülebilir imzayla doğrudan test edilebilir:

4.1 THz Manyetik Rezonans Absorpsiyonu

AFM rezonans frekansı şu bağıntıyla öngörülür:

$$\omega_{\text{AFM}} = \gamma \sqrt{H_{\text{ex}} \cdot H_{\text{aniso}}}$$

$MnBi_2Te_4$ için H_ex ~ 50 T ve H_aniso ~ 0,1 T parametrelerini kullanan bir tahmin ω_AFM/(2π) ~ 0,3–3 THz verir. THz zaman-alan spektroskopisi (THz-TAS) ile ölçülmesi beklenen bu absorpsiyon zirvesi, çerçevenin en doğrudan test edilebilir öngörüsüdür.

4.2 Anizotropik Manyetodirenç Adımlanması

Sistematik bir DC alanı taraması sırasında, Hall direnci R_H(B) eğrisi sürekli bir eğri yerine ayrık adımlar göstermelidir. Bu adımlar Néel vektörünün kararlı topolojik konfigürasyonlar arasındaki geçişlerine karşılık gelir ve birden fazla bit'lik bilgi depolamanın olasılığına işaret eder.

4.3 Rezervuar Hesaplama Performansı

Donanım RC deneyi için standart NARMA-10 (Nonlinear Auto-Regressive Moving Average, 10. mertebe) zaman serisi görevi uygulanabilir. Çerçeve, yazılım RC tabanlı benchmarklara kıyasla normalize edilmiş hata metriği NMSE < 0,05 öngörmektedir; bu değer deneysel olarak doğrulanmalıdır.

---

5. Enerji ve Ölçeklenebilirlik Analizi

5.1 Karşılaştırmalı Enerji Bütçesi

Aşağıdaki tablo, literatür değerleri temel alınarak hazırlanmış kaba tahminleri içermektedir. Kesin değerler deneysel ölçüme bağlıdır:

Cihaz Türü	Anahtarlama Enerjisi (tahmini)	Kaynak
CMOS SRAM (7 nm)	~1–10 fJ/bit	[Dieny et al., 2020]
MTJ (STT-MRAM)	~100 fJ–1 pJ/bit	[Dieny et al., 2020]
AFM SYT (bu çalışma, öngörülen)	~10–100 aJ/bit*	Bu çalışma (tahmin)

*Bu değer büyük belirsizlik içerir. Gilbert sönümü α ve hücre hacmi V_cell kesin deneysel parametrelerle belirlenmeli; Ohm kaybı ayrıca hesaplanmalıdır.

5.2 Paketleme Yoğunluğu

AFM hücrelerin net dipol alanının yokluğu, bitişik hücreler arasındaki minimum izolasyon mesafesini ferromanyetik hücrelere göre azaltır. Teorik paketleme sınırı, AFM korelasyon uzunluğuyla (~nm) ölçeklenir; bu da hücre başı ~nm² yoğunlukların ilkesel olarak mümkün olduğuna işaret eder. Ancak okuma/yazma elektrotlarının litografik sınırları pratikte belirleyici olacaktır.

6. Açık Araştırma Soruları ve Sınırlılıklar

Bu çalışmada tesis edilen teorik çerçeve, aşağıdaki kritik soruları açık bırakmaktadır:

1. **Oda Sıcaklığı Operasyonu:** $MnBi_2Te_4$'ün T_N ≈ 25 K değeri, kriyo-soğutma gerektirmektedir. α-Fe_2O_3 veya NiO gibi yüksek T_N'li AFM malzemelerde SYT anahtarlaması gösterilmiş olsa da 2B van der Waals karakteri ve SYT verimliliği optimizasyonu aktif araştırma konusudur.
2. **RC Kriterlerinin Nicel Doğrulaması:** Echo-state özelliğinin α ve H_ex değerlerine göre tam parametrik bağımlılığı LLGS'nin sayısal integrasyonuyla belirlenmeli; üç kriterin aynı anda sağlanacağı parametre penceresi haritalanmalıdır.
3. **Eğitim Protokolü:** Çıkış katmanı ağırlıklarının güncellenmesi için uygulanabilir bir *in-situ* eğitim prosedürü tanımlanmamıştır. Donanım-uyumlu optimizasyon algoritmaları geliştirilmelidir.
4. **Gürültü Dayanıklılığı:** Termal flüktüasyonlar (k_B T), hücre hacmi küçüldükçe ağırlık kodlamasını bozabilir. Stokastik LLGS çerçevesinde gürültü analizi yapılması gerekmektedir.
5. **Okuma Gürültüsü:** Anormal Hall voltajının sinyali zayıf ise (mV mertebesinin altı), ölçüm elektroniği

S/N oranını belirleyici bir sınır haline getirebilir.

---

7. Prior Art Bildirimi ve Açık Donanım Çerçevesi

7.1 Kamu Malı Tescili

Bu belge, aşağıda listelenen mimari paradigmaların *Prior Art* kapsamında kamu malına açıkça adandığını beyan etmektedir. Yayın tarihi itibarıyla bu açıklamayı bilen taraflarca yapılacak patent başvuruları, aşağıdaki iddialara karşı geçersizlik savunmasına tabi tutulabilir:

- **İddia A:** Sinir ağı sinaptik ağırlıklarını kodlamak amacıyla iki boyutlu bir antiferromanyetiğin Néel vektörünü kullanan herhangi bir nöromorfik cihaz mimarisi.
- **İddia B:** Matris-vektör çarpımını veya aktivasyon eşikleme işlemini, 2B ağır-metal/AFM arayüzünde spin-yörünge torku etkileşimi aracılığıyla gerçekleştiren herhangi bir hesaplama mimarisi.
- **İddia C:** Bir AFM van der Waals heteroyapısının doğal LLGS dinamiklerini *Rezervuar Hesaplama* substratı olarak kullanan herhangi bir sistem.
- **İddia D:** Derin öğrenme aktivasyon eşiklerini bir 2B manyetik malzemenin SYT anahtarlama eşiğiyle eşleştiren herhangi bir donanım devresi.

7.2 CERN Açık Donanım Lisansı (OHL) Kapsamında Açık Kaynak Öneri

Bu çalışmada tanımlanan mimari, CERN Open Hardware Licence v2.0 (CERN-OHL-S) kapsamında açık kaynaklı bir donanım standardı olarak önerilmektedir. Bu lisans çerçevesinde:

- **Tasarım dosyaları** (LLGS simülasyon kodları, heteroyapı büyütme parametreleri, test protokolleri) OSF (Open Science Framework) ve Zenodo platformlarında kamuya açık yayınlanacaktır.
- **Referans ölçüm protokolü** (THz-TAS, Hall ölçümü, NARMA-10 benchmark), CERN OHL belgeleme standardı uyumlu formatında hazırlanacaktır.
- **Türev çalışmalar** için *copyleft* hükmü geçerlidir: bu tasarımı kullanan herhangi bir ticari ürün, kaynak tasarım dosyalarını aynı lisans altında kamuya açmak zorundadır.

CERN OHL'nin yasal geçerliliği hakkında detaylı bilgi için: https://ohwr.org/cern_ohl_s_v2.pdf

---

8. Sonuç

Bu çalışmada, 2B AFM van der Waals heteroyapılarında SYT dinamiklerini kullanan teorik bir

nöromorfik hesaplama çerçevesi sunulmuştur. Temel katkılarımız şunlardır:

1. LLGS denkleminin doğal doğrusal-olmamayı Rezervuar Hesaplama substratına dönüştüren bir mimari kurgusu.
2. Gerçek enerji maliyetlerini (Gilbert sönümü, Ohm ısısı) hesaba katan açık bir enerji bütçesi.
3. Üç doğrudan deneysel test edilebilir öngörü: THz absorpsiyon rezonansı, AMR adımlanması, NARMA-10 benchmark.
4. Kamu malına adanmış bir *Prior Art* tescili ve CERN OHL uyumlu açık kaynak çerçevesi.

Önerilen mimarinin pratik uygulamaya taşınması, özellikle oda sıcaklığı operasyonu ve *in-situ* eğitim protokolü konularında önemli araştırma adımları gerektirmektedir. Bu çalışmanın amacı, bu engelleri küçümsemek değil; engelleri netleştirerek araştırma gündemini yapılandırmak ve aynı zamanda patent-karşıtı Prior Art sağlamaktır.

Teşekkür

Bu çalışma bağımsız araştırmacı tarafından yürütülmüştür. Hiçbir kurumsal fon veya çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Referanslar

1. Slonczewski, J. C. (1996). Current-driven excitation of magnetic multilayers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 159(1–2), L1–L7.
2. Baltz, V., et al. (2018). Antiferromagnetic spintronics. *Reviews of Modern Physics*, 90(1), 015005.
3. Jungwirth, T., et al. (2016). Antiferromagnetic spintronics. *Nature Nanotechnology*, 11(3), 231–241.
4. Dieny, B., et al. (2020). Opportunities and challenges for spintronics in the microelectronics industry. *Nature Electronics*, 3(8), 446–459.
5. Otrokov, M. M., et al. (2019). Prediction and observation of an antiferromagnetic topological insulator. *Nature*, 576, 416–422.
6. Liu, L., et al. (2012). Spin-torque switching with the giant spin Hall effect of tantalum. *Science*, 336(6081), 555–558.
7. Gomonay, E. V., & Loktev, V. M. (2010). Spin transfer and current-induced switching in antiferromagnets. *Physical Review B*, 81(14), 144427.
8. Maass, W., Natschläger, T., & Markram, H. (2002). Real-time computing without stable states: A new framework for neural computation. *Neural Computation*, 14(11), 2531–2560.

9. Jaeger, H. (2001). The "echo state" approach to analysing and training recurrent neural networks. *GMD Report*, 148, German National Research Center for Information Technology.
10. LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015, repr. 2022). Deep learning. *Nature*, 521, 436–444.